

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
для виконання курсової роботи  
з навчальної дисципліни

**«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ»**

*(для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти  
за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальності  
141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (фахове  
спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних засобів»,  
«Електричний транспорт», «Електромеханічні системи автоматизації  
та електропривод»))*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2017**

Методичні вказівки для виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного керування» (для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (фахове спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних засобів», «Електричний транспорт», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»))) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : Я. В. Щербак, К. Я. Івакіна. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 30 с.

Укладачі: д-р техн. наук, проф. Я. В. Щербак,  
канд. техн. наук ст. викл. К. Я. Івакіна

Рецензент:  
Ю. М. Кутовий, професор кафедри «Автоматизовані  
електромеханічні системи» НТУ «ХП»

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 3  
від 18.10.2016 р.*

## ЗМІСТ

1 ЗАВДАННЯ ТА ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	4
2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	7
2.1 Розробка структурної схеми системи регулювання струму збудження.....	7
2.2 Аналіз статичних та динамічних характеристик складових елементів системи.....	7
2.3 Синтез передавальної функції регулятора та електричної схеми регулятора.....	16
2.4 Аналіз сталого та перехідного процесів спроектованої системи регулювання.....	20
2.5 Синтез електричної схеми регулятора.....	21
2.6 Моделювання перехідних процесів спроектованої системи автоматичного регулювання.....	23
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	25
ДОДАТОК А Варіанти завдань на курсову роботу.....	26
ДОДАТОК Б Електричні ланки корегуючих кіл системи автоматичного регулювання.....	27

# 1 ЗАВДАННЯ ТА ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Темою курсової роботи є розробка системи автоматичного регулювання струму обмотки збудження електричного двигуна постійного струму. Електрична схема об'єкта регулювання показана на рисунку 1.1.

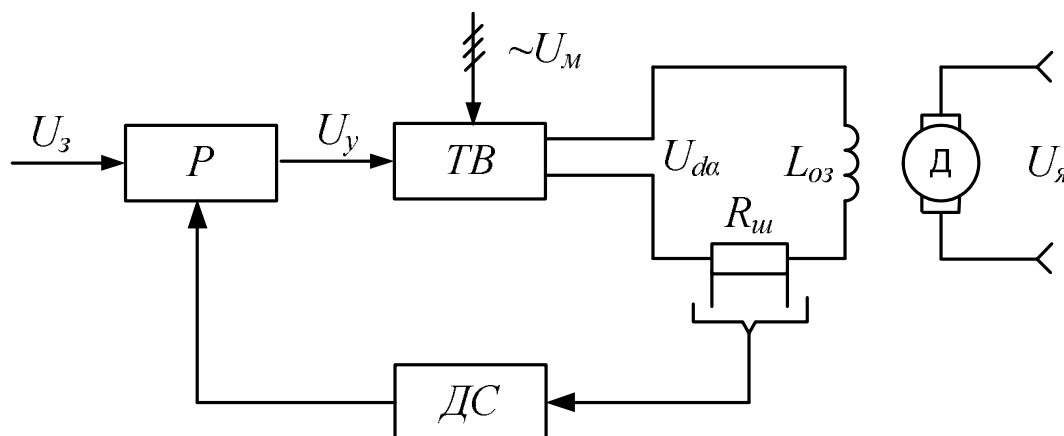


Рисунок 1.1 – Електрична схема об'єкта регулювання

Живлення обмотки збудження (ОЗ) двигуна (Д) виконується від керованого тиристорного випрямляча (ТВ). Контроль за струмом обмотки збудження здійснюється за допомогою шунта  $R_{ш}$ , сигнал якого підсилюється датчиком струму (ДС). Датчик струму також забезпечує гальванічне розділення між силовою частиною схеми і регулятором (Р), що поліпшує заводозахищеність схеми та безпеку її обслуговування.

На рисунку 1.2 наведена блок-схема датчика струму, побудованого по типу МДМ.

Модулятор М виконує амплітудно-імпульсну модуляцію сигналу шунта  $U_{ш}$ . Промодульований сигнал через трансформатор Т подається на інформаційний вхід демодулятора ДМ. За допомогою трансформатора забезпечується гальванічне розділення вхідного та вихідного кіл датчика. Демодулятор відновлює форму сигналу  $U_{ш}$  і може виконувати його

підсилення. Керування процесами модуляції та демодуляції виконує генератор Г.

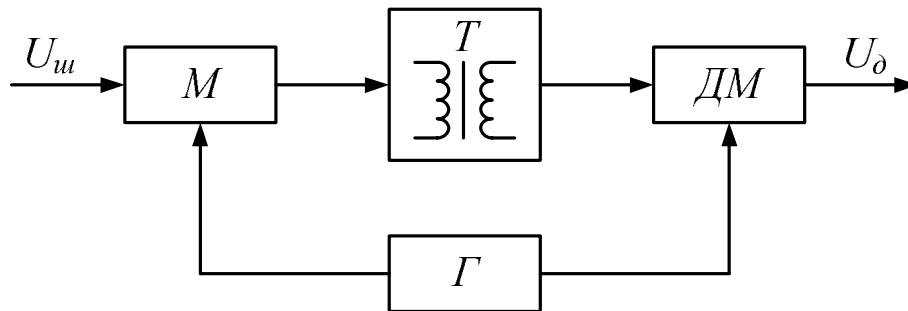


Рисунок 1.2 – Блок-схема датчика струму

Курсова робота включає в себе такі складові частини:

- 1) розробка структурної схеми системи регулювання струму збудження;
- 2) аналіз статичних та динамічних характеристик складових елементів системи;
- 3) синтез передавальної функції регулятора;
- 4) аналіз сталого та перехідного процесів спроектованої системи регулювання;
- 5) синтез електричної схеми регулятора.

Вихідні дані до виконання курсової роботи наведені в Додатку А.

При виконанні курсової роботи необхідно дотримуватися таких положень:

1. Пояснювальна записка до курсової роботи пишеться чорнилами на стандартних аркушах розміром  $210 \times 297$ ; на обкладинці пояснювальної записки необхідно зазначити дисципліну, шифр роботи, спеціальність, прізвище, ініціали і шифр групи студента.

2. Пояснювальна записка повинна бути написана охайно, зрозумілим почерком, без скорочення слів або набрана на комп'ютері.

3. Розрахунки потрібно супроводжувати поясненнями. Розрахункові формули приводяться спочатку у загальному вигляді з застосуванням

прийнятих літерних позначень, після чого слід підставити у формулу числові величини, а потім проставити результат.

Необхідно навести пояснення величин, що входять у формулу, обов'язково проставляючи для отриманих величин їх розмірності. При виборі необхідних розрахункових величин і параметрів, використанні таблиць, формул, довідкових матеріалів необхідно робити посилання на джерела; використану літературу (автор, назва книги, рік видання) слід навести в кінці пояснювальної записки. Матеріал слід наводити з дотриманням прийнятої в технічній літературі термінології.

4. Графічна частина роботи (ескізи, рисунки, креслення) виконуються з використанням креслярського інструменту і відповідно до прийнятих ДСТУ.

5. Сторінки пояснювальної записки, ілюстрації, таблиці і графіки повинні бути пронумеровані. Таблиці повинні мати назву, ілюстрації та графіки – підписуночі підписи.

6. Курсова робота обов'язково підписується студентом і ставиться дата її виконання.

## **2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

### **2.1 Розробка структурної схеми системи регулювання струму збудження**

Для розрахунку контуру регулювання струму виконують побудову його структурної схеми.

Структурна схема вміщує в собі такі елементи: вузол порівняння, регулятор струму, тиристорний випрямляч, обмотка збудження, датчик струму. Елементи на структурній схемі позначають прямокутниками, в які вписують назви передавальних функцій у вигляді перетворення Лапласа.

### **2.2 Аналіз статичних та динамічних характеристик складових елементів системи**

На даному етапі слід виконати наступне:

- вивід формули передавальної функції обмотки збудження;
- розрахунки регулювальної характеристики тиристорного випрямляча;
- лінійаризація регулювальної характеристики тиристорного випрямляча;
- розрахунок коефіцієнта підсилення датчика струму;
- розрахунки та побудова частотних характеристик електричного ланцюга, до складу якого входять тиристорний випрямляч, обмотка збудження та датчик струму.

**2.2.1** Для виводу передавальної функції обмотки збудження користуються її еквівалентною електричною схемою, що міститься на рисунку 2.1.

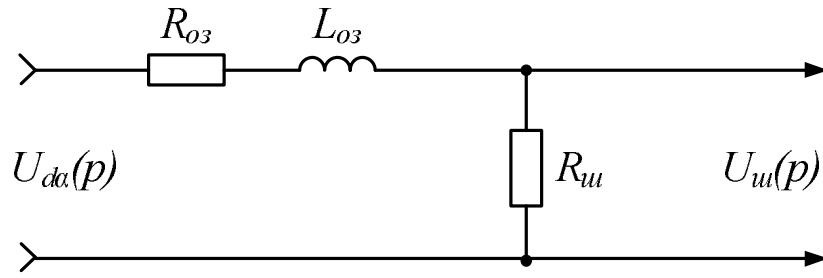


Рисунок 2.1 – Еквівалентна електрична схема

на якому:  $R_{o3}$  – активна складова частина опору обмотки;

$L_{o3}$  – індуктивність обмотки;

$R_{ш}$  – опір шунта.

Передавальну функцію одержують, як відношення вихідного та вхідного опорів схеми, записаних у формі перетворювання Лапласа:

$$H_{o3}(p) = \frac{U_{ш}(p)}{U_{d\alpha}(p)} = \frac{Z_{вих}(p)}{Z_{вхiд}(p)}, \quad (2.1)$$

**2.2.2 Живлення обмотки збудження виконує тиристорний випрямляч з лінійним опорним сигналом в системі імпульсно-фазового керування.** Опорний сигнал одержують інтегруванням постійної напруги  $U_0$  за половину періоду напруги, що живить тиристорний випрямляч мережі. Для  $n$ -го інтервалу роботи тиристорного випрямляча опорний сигнал характеризується такою аналітичною залежністю:

$$U_{oc} = \frac{1}{\omega_o \cdot T_o} \int_{\theta_{[n-1]}}^{\theta_u} U_o d\theta = \frac{U_o \cdot \theta}{\omega_o \cdot T_o}, \quad (2.2)$$

де  $T_o$  – стала часу інтегратора;

$\theta$  – змінна кутова координата;

$\omega_o = 2 \cdot \pi \cdot f_o$ ;  $f_o = 50$  Гц.

Кут відкриття чергового тиристора випрямляча визначається умовою перемикання компаратора в системі керування:

$$U_{oc}(\theta) = U_y(\theta). \quad (2.3)$$



На підставі цієї умови функціональна залежність кута керування тиристорного випрямляча від величини напруги  $U_y$  має вигляд:

$$\alpha = \frac{\omega_o \cdot T_o \cdot U_y}{U_o}, \quad (2.4)$$

$$\text{де } \frac{\omega_o \cdot T_o}{U_o} = \frac{\pi}{20}.$$

Середнє значення вихідної напруги тиристорного випрямляча при  $\alpha = 0$ :

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2} \cdot m}{\pi} \cdot U_m \cdot \sin \frac{\pi}{m}. \quad (2.5)$$

В керованому режимі середнє значення вихідної напруги для неперервного струму в колі обмотки збудження:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha. \quad (2.6)$$

Підстановка формули (2.4) у формулу (2.6) дає вираз регулювальної характеристики тиристорного випрямляча:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos U_y \cdot \frac{\pi}{20}. \quad (2.7)$$

Неперервний струм в обмотці збудження зберігається до кута регулювання тиристорного випрямляча, величина якого

$$\alpha_{\max} = \arctg \frac{\omega_1 \cdot L_{oz}}{R_{oz}}, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \omega_1 = \omega_o \cdot m.$$

Підстановка формули (2.8) у формулу (2.4) дає значення максимальної величини управляючої напруги  $U_y$  для режиму неперервного струму в обмотці збудження:

$$U_{y\max} = \alpha_{\max} \cdot \frac{U_o}{\omega_o \cdot T_o}. \quad (2.9)$$

Розрахунок регулювальної характеристики тиристорного випрямляча виконується за формулою (2.7) підстановкою  $U_y$  від нуля до  $U_{y\max}$ . Крок зміни величини  $U_y$  вибирають таким, щоб забезпечити достатню кількість точок для побудови графіка. Результати розрахунків записують до таблиці 2.1 і будують графік регулювальної характеристики.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків

$U_y$ , [В]									
$\alpha$ , [Гр]									
$U_{d\alpha}$ , [В]									

В усталеному режимі на обмотку збудження для забезпечення струму  $I_o$  від тиристорного випрямляча подається напруга, величина якої:

$$U_{d\alpha 0} = I_o \cdot R_{oz}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } I_o = \frac{U_{d0}}{2 \cdot R_{oz}}.$$

Використовуючи формули (2.7) та (2.10), розраховують величину напруги управління  $U_{y0}$  в усталеному режимі. Величини напруг  $U_{y0}$  та  $U_{d\alpha 0}$  наносять на осях регулювальної характеристики тиристорного випрямляча, а на графіку помічають положення робочої точки усталеного режиму.

Лінеаризують регулювальну характеристику методом дотичної в робочій точці. В результаті виконання цієї операції тиристорний випрямляч замінюється лінійним елементом з коефіцієнтом підсилення

$$K_{TB} = \left. \frac{dU_{d\alpha}}{dU_y} \right|_{U_y=U_{y0}}. \quad (2.11)$$

Одержану величину коефіцієнта підсилення перевіряють графічним методом:

$$K_{TB} \approx \frac{\Delta U_{d\alpha}}{\Delta U_y}, \quad (2.12)$$

де відхилення  $\Delta U_y$  задаємо симетрично  $U_{y0}$ .

В силу неповної керованості (дискретності) тиристорного випрямляча реакція його вихідної напруги на зміну вхідного управляючого сигналу має запізнення, яке приблизно дорівнює половині інтервалу дискретності:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot f_o \cdot m}, \quad (2.13)$$

де  $m$  – пульсність випрямляча.

Для поліпшення завадостійкості тиристорного випрямляча на вході його системи імпульсно-фазового управління встановлюють фільтруючу ланку з передавальною функцією:

$$H_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi \cdot p + 1}. \quad (2.14)$$

Враховуючи особливості динамічних параметрів на структурній схемі системи автоматичного регулювання, передавальна функція керованого випрямляча має вигляд передавальної функції аперіодичної ланки із запізненням:

$$H_{TB}(p) = \frac{K_{TB} \cdot e^{-\tau p}}{T_\phi \cdot p + 1}. \quad (2.15)$$

**2.2.3** Шунт для вимірювання струму обмотки збудження вибирають згідно з його величиною  $I_0$  за таблицею 2.2.

Таблиця 2.2 – Величина шунта для вимірювання

$I_{ш}, \text{ A}$	5	10	20	30	50	100
$U_{ш}, \text{ мВ}$	75	75	75	75	75	75

Величину опору шунта розраховують, використовуючи співвідношення:

$$R_{ш} = \frac{U_{ш}}{I_{ш}}. \quad (2.16)$$

**2.2.4** Розрахунок коефіцієнта підсилення датчика струму виконують в усталеному режимі. При цьому зробимо допущення, що коефіцієнт передачі електричної ланки, складеної з тиристорного випрямляча, обмотки збудження та датчика струму, дорівнює одиниці, тобто

ї

$$U_{y0} = U_{дс}. \quad (2.17)$$

З урахуванням коефіцієнтів підсилення тиристорного випрямляча та обмотки збудження маємо:

$$K_{дс} = \frac{1}{K_{тв} \cdot K_{оз}}, \quad (2.18)$$

Датчик струму має передавальну функцію аперіодичної ланки першого порядку із сполучною частотою  $f_{дс}$ , та коефіцієнтом підсилення  $K_{дс}$ .

$$H_{дс}(p) = \frac{K_{дс}}{T_{дс} \cdot p + 1}. \quad (2.19)$$

де  $T_{дс} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{дс}}$  – стала часу датчика струму.

**2.2.5** Для розрахунків частотних характеристик аналізованої системи автоматичного регулювання записуємо її загальну передавальну функцію:

$$W(p) = H_{тв}(p) \cdot H_{оз}(p) \cdot H_{дс}(p). \quad (2.20)$$

Для розрахунку амплітудно-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) передавальну функцію системи записують у вигляді:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (2.21)$$

враховуючи те, що

$$e^{-j\tau\omega} = \cos \tau\omega - j \sin \tau\omega. \quad (2.22)$$

Змінюючи частоту в діапазоні  $0 \leq \omega \leq \infty$ , на комплексній площині будують годограф АФЧХ. Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.3.

Амплітудно-фазо-частотна характеристика системи із запізненням може бути побудована за АФЧХ системи без урахування запізнення, якщо повернути кожен її радіус-вектор  $A(\omega)$  (див. рис. 2.2) за годинниковою стрілкою на кут, який дорівнює  $\beta = \tau \cdot \omega$ .

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків

$\omega$	$U(\omega)$	$V(\omega)$
0		
1		
2		
5		
10		
...		
10000		

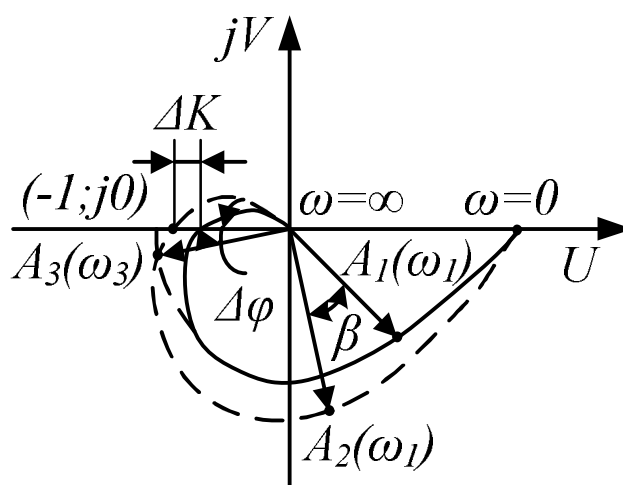


Рисунок 2.2 – Амплітудно-фазо-частотна характеристика

Користуючись критерієм Найквіста, по одержаному годографу досліджують стійкість системи та запас стійкості. Якщо годограф АФЧХ розімкнутої системи не охоплює точку з координатами  $(-1; j0)$ , то замкнута система автоматичного регулювання стійка. Відділення годографа від точки з координатами  $(-1; j0)$  визначає запас стійкості  $\Delta K$  по коефіцієнту підсилення, а кут  $\Delta\varphi$ , що прилягає до радіуса-вектора  $A_3(\omega_3)=1$ , визначає запас стійкості системи по фазі.

Розрахунки амплітудної частотної характеристики (АЧХ) виконують згідно з формулою:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{U_u^2(\omega) + V_u^2(\omega)}{U_z^2(\omega) + V_z^2(\omega)}}, \quad (2.23)$$

де  $U_u$ ,  $U_z$  – коефіцієнти при дійсних частинах поліномів чисельника та знаменника частотної передавальної функції системи  $W(j\omega)$ ;

$V_u$ ,  $V_z$  – коефіцієнти при уявних частинах поліномів чисельника та знаменника частотної передавальної функції системи  $W(j\omega)$ ;

Фазова частотна характеристика (ФЧХ) розраховується як:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V_u(\omega)}{U_u(\omega)} - \arctg \frac{V_z(\omega)}{U_z(\omega)}. \quad (2.24)$$

Розраховуючи частотні характеристики, можна замість  $\omega$  у формули підставляти  $f$ , пам'ятаючи, що  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Для побудови логарифмічних частотних характеристик розраховують амплітудну характеристику в децибелах:

$$A[\text{дБ}] = 20 \cdot \lg A. \quad (2.25)$$

Результати розрахунків заносять до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків

$\omega$	$A$	$A[\text{дБ}]$	$\varphi$ , град	$f_{\text{Л}}$

Побудову графіків АЧХ та ФЧХ виконують, використовуючи лінійний і логарифмічний масштаби. Для побудови логарифмічних частотних характеристик по осі частот відкладають логарифми частот  $f_{\text{Л}} = \lg f$ , користуючись одиницями виміру октава та декада. По осі модуля коефіцієнта підсилення відкладають його величини у децибелах. Величини фазового кута  $\varphi$  відкладають в градусах. Для побудови графіків використовують загальну вісь частот (рис. 2.3).

На графік логарифмічної амплітудної частотної характеристики наносять асимптоти. При побудові асимптотичної характеристики пам'ятають, що сполучні частоти ( $\omega_{\text{сн}}$ ) передавальної функції  $W(p)$  розраховуються як:

$$\omega_{\text{ТВ}} = \frac{1}{T_{\text{ТВ}}}; \quad \omega_{\text{ОЗ}} = \frac{1}{T_{\text{ОЗ}}}; \quad \omega_{\text{ДС}} = \frac{1}{T_{\text{ДС}}}. \quad (2.26)$$

Нахил асимптоти для частот  $\omega \geq \omega_{\text{сн}}$  у ланки першого порядку 20 дБ/дек, ланки другого порядку 40 дБ/дек і т.д. На побудованих логарифмічних частотних характеристиках розімкнутої системи визначають запас стійкості по коефіцієнту підсилення  $\Delta K$  та запас стійкості по фазі  $\Delta \varphi$ .

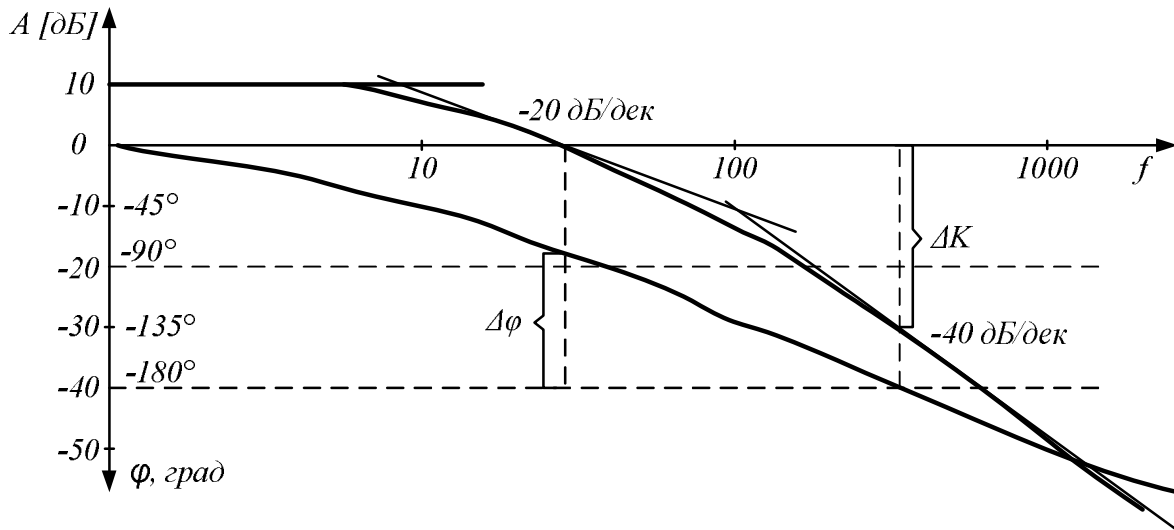


Рисунок 2.3 – Логарифмічної амплітудної частотної характеристики

Запас стійкості по коефіцієнту підсилення  $\Delta K$  визначають на частоті, для якої  $\varphi = -180^\circ$ . Запас стійкості по фазі  $\Delta\varphi$  визначають на частоті, де  $A = 0$  дБ.

## 2.3 Синтез передавальної функції регулятора та електричної схеми регулятора

**2.3.1** Синтез передавальної функції регулятора виконують, використовуючи логарифмічні частотні характеристики ( $L_s$ ) розімкнутої заданої системи. Вихідними даними для дослідження є величина похибки  $\varepsilon$  в статичному режимі, величина перерегулювання  $\delta = (h_{\max} - h_{\text{уст}})/h_{\text{уст}}$  та величина часу перехідного режиму  $t_p$  (рис. 2.4).



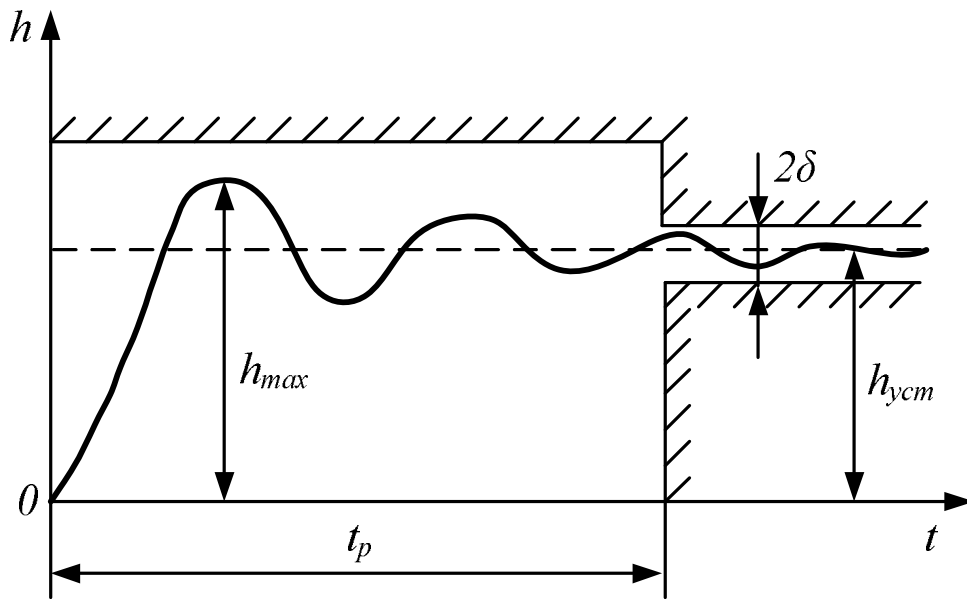


Рисунок 2.4 – Графік перехідного процесу

На базі цих даних виконують побудову бажаної ( $L_\epsilon$ ) логарифмічної амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи регулювання.

При побудові бажаної ЛАХ використовують такі рекомендації.

**2.3.2** Низькочастотна область ЛАХ (рис. 2.5) головним чином визначає точність системи автоматичного регулювання.

Зв'язок між величиною коефіцієнта підсилення та величиною похибки для статичної системи має вигляд:

$$L(0) = 20 \cdot \lg \left( \frac{X}{\epsilon} - 1 \right), \quad (2.27)$$

де  $X$  – вхідний сигнал САР;

$\epsilon$  – похибка регулювання.

**2.3.3** Середньочастотна область, яка включає в себе частоту зрізу системи  $\omega_3$ , в основному обумовлює запас стійкості замкнутої системи та її динамічні характеристики. В цій зоні нахил ЛАХ встановлюють -20 дБ/дек, що в загальних випадках забезпечує достатній запас стійкості.

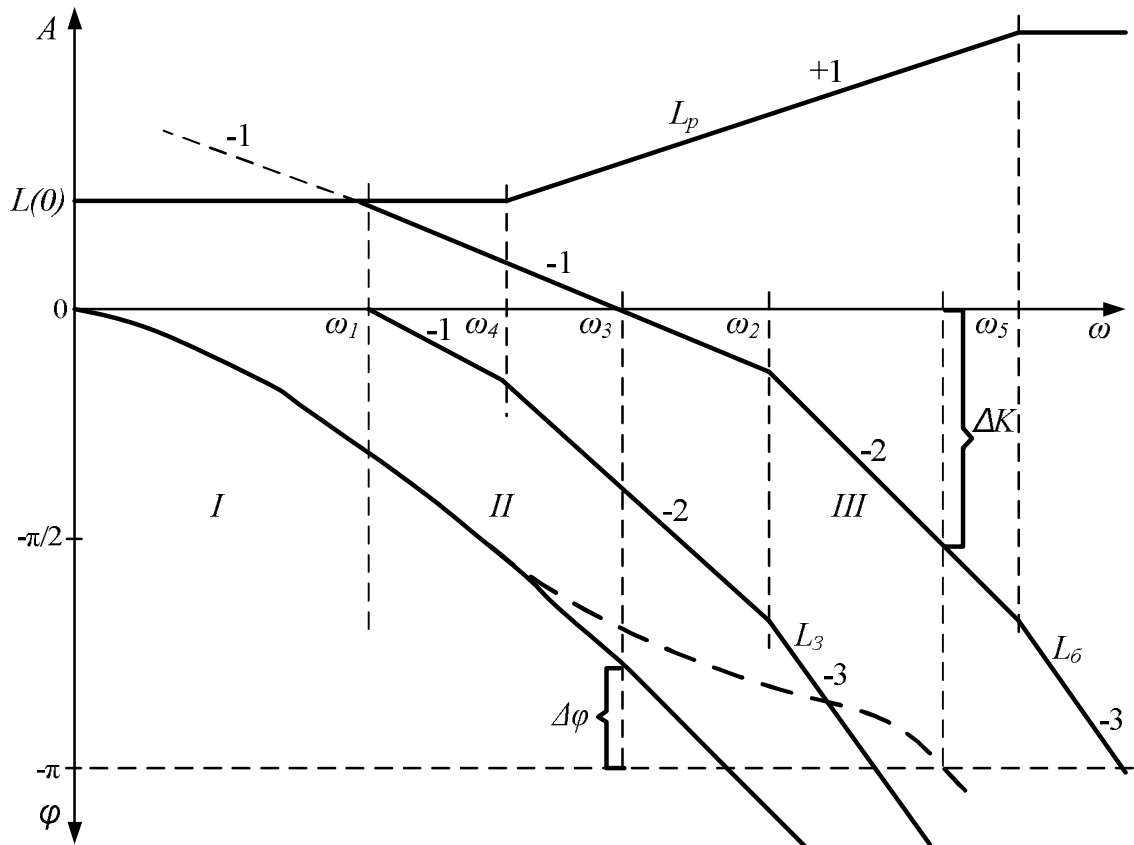


Рисунок 2.5 – Логарифмічної амплітудної частотної характеристики

Значення частоти зрізу  $\omega_3$  системи розраховують за формулою:

$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot \lambda_\delta}{t_p}, \quad (2.28)$$

де  $t_p$  – час перехідного режиму (час, за який відхилення перехідної функції замкнутої системи стає меншим за  $\varepsilon = (1 \div 5)\%$  її усталеної величини).

Залежність коефіцієнта  $\lambda_\delta$  від величини перерегулювання  $\delta$  показана на рисунку 2.6.

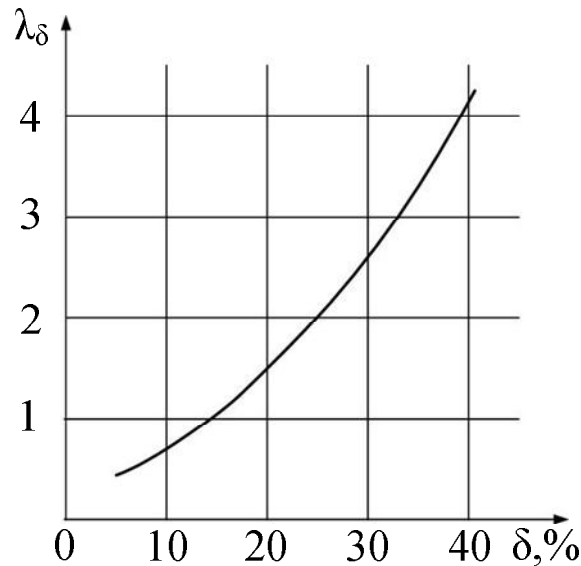


Рисунок 2.6 – Залежність коефіцієнта  $\lambda_\delta$  від величини перерегулювання  $\delta$

Сполучні частоти середньочастотної області ЛАХ з низькочастотною та високочастотною областями можна розрахувати, використовуючи такі співвідношення:

$$\omega_1 \approx \frac{\omega_3^2}{\omega_2}; \quad \omega_2 \approx (2 \div 4) \cdot \omega_3. \quad (2.29)$$

**2.3.4** Високочастотна область ЛАХ порівняно з середньочастотною мало впливає на перехідний процес, тому її будують як можна ближчою до ЛАХ заданої системи. Нахил ЛАХ в цій області складає -40 дБ/дек. та -60 дБ/дек.

**2.3.5** Побудову фазових частотних характеристик заданої та скоригованої систем виконують згідно з формулою (2.24).

На побудованих ЛАХ та фазовій частотній характеристиці позначають запас по фазі  $\Delta\varphi$  та запас по коефіцієнту підсилення  $\Delta K$ .

Асимптотичну логарифмічну амплітудну характеристику регулятора ( $L_p$ ) будують згідно з формулою:

$$L_p = L_\delta - L_3. \quad (2.30)$$

По ЛАХ регулятора записують його передавальну функцію  $H_p(p)$ . При цьому пам'ятають, що нахил ЛАХ -20 дБ/дек (-1) має інтегруюча ланка першого порядку. Нахил ЛАХ -40 дБ/дек (-2) має інтегруюча ланка другого порядку. Нахил ЛАХ +20 дБ/дек (+1) та нахил +40 дБ/дек (+2) мають диференціюючі ланки першого та другого порядків і так далі.

Передавальна функція регулятора, ЛАХ якого побудована на рисунку 2.5, має вигляд:

$$H_p(p) = \frac{K \cdot (T_4 p + 1)}{T_5 p + 1} \quad (2.31)$$

Одержаною передавальною функцією регулятора доповнюють структурну схему проектованої системи автоматичного регулювання та записують загальну її передавальну функцію.

$$W(p) = \frac{H_p(p) \cdot H_{TB}(p) \cdot H_{O3}(p)}{1 + H_p(p) \cdot H_{TB}(p) \cdot H_{O3}(p)} \quad (2.32)$$

## **2.4 Аналіз сталого та перехідного процесів спроектованої системи регулювання**

Для перевірки відповідності статичних та динамічних параметрів спроектованої системи вимогам завдання на розробку виконують розрахунок її перехідної функції.

Якість спроектованої системи оцінюють по графіку перехідного процесу, спричиненого якимось типовим зовнішнім діянням. Найчастіше застосовують ступінчате діяння  $U_3(t) = A(t)$ , де величину  $A$  вибирають відповідно до варіанта завдання.

Зображення перехідної функції системи має вигляд:

$$H(p) = \frac{A \cdot W(p)}{p}. \quad (2.33)$$

Оригінал перехідної функції системи одержують як суму вичитів в особливих точках:

$$h(t) = \sum_{i=1}^u \frac{U(p_i)}{V'(p_i)} \cdot e^{p_i \cdot t}. \quad (2.34)$$

При розрахунках  $h(t)$  величину кроку часу  $t$  вибирають такою, щоб одержати достатню кількість точок для побудови графіка.

Результати розрахунку заносять до таблиці 2.5, за якою будують графік перехідної функції  $h(t)$ .

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків

$t, c$											
$h(t)$											

На графік  $h(t)$  наносять час перехідного процесу  $t_p$ , величину похибки  $\varepsilon$  та вираховують величину перерегулювання  $\delta$ . Одержані з графіку величини  $t_p$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$  порівнюють із завданням до курсової роботи. Якщо одержані параметри перевищують задані, то корегують  $L_d$  і знову роблять розрахунки, починаючи з формули (2.30).

## 2.5 Синтез електронної схеми регулятора

**2.5.1** Схемну реалізацію передавальної функції регулятора виконують на пасивних та активних елементах. Пасивну електричну ланку виконують відповідною до передавальної функції з'єднанням резисторів та

конденсаторів. Синтез електричної схеми виконують, використовуючи формулу (2.1). При послідовному з'єднанні пасивних електричних ланок враховують те, що попередня ланка повинна бути джерелом напруги по відношенню до наступної. Ця умова виконується, якщо вхідний опір наступної електричної ланки значно більший вихідного опору попередньої.

Активну електричну ланку виконують на операційних підсилювачах. Синтез схеми базується на тому, що передавальна функція електричної схеми на операційному підсилювачі з використанням його інвертуючого входу має вигляд:

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}, \quad (2.35)$$

де  $Z_2(p)$  – опір елементів зворотнього зв'язку;

$Z_1(p)$  – опір елементів на вході.

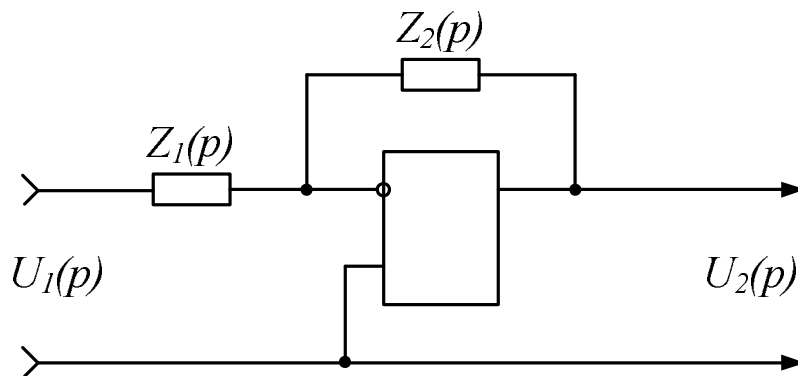


Рисунок 2.7 – Електрична схема на операційному підсилювачі

Опори  $Z_1(p)$ ,  $Z_2(p)$  можуть нести активні та реактивні складові. Конструктивно їх виконують відповідним до передавальної функції синтезуємої електричної ланки з'єднанням конденсаторів та резисторів.

В додатку Б наведені приклади схемних реалізацій пасивних та активних електричних ланок.

**2.5.2** Після синтезу електричної схеми регулятора виконують креслення загальної електричної схеми спроектованої системи автоматичного регулювання згідно з вимогами ЄСКД. Електрична схема системи регулювання має:

- електричну схему трифазного тиристорного випрямляча, живлення якого виконується через трансформатор від промислової електричної мережі;
- блок-схему системи імпульсно фазового керування;
- електричну схему обмотки збудження;
- блок-схему датчика струму;
- електричну схему регулятора.





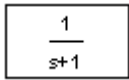



## **2.6 Моделювання перехідних процесів спроектованої системи автоматичного регулювання**

Моделювання перехідних процесів спроектованої системи автоматичного регулювання виконують за допомогою пакету математичних і інженерних обчислень *MATLAB 6.5*. Вся модель будується з блоків, що мають входи і виходи. Основні блоки, необхідні для виконання моделювання спроектованої САР в пакеті *Simulink*, наведені в таблиці 2.6.

На першому етапі моделювання виконують у вигляді неперервної ланки загальної передавальної функції регулятора.

На другому етапі перехідні процеси спроектованої САР моделюють в реальному зображенні, тобто в схему загальної передавальної функції регулятора включають мостову схему трифазного тиристорного випрямляча.

Таблиця 2.6 – Блоки в пакеті Simulink

	<i>Constant</i> – сигнал постійної величини.
	<i>Step</i> – ступінчастий сигнал, міняється час стрибка ( <i>Step Time</i> ), початкове ( <i>Initial Value</i> ) і кінцеве значення ( <i>Final Value</i> ).
	<i>Display</i> – цифровий дисплей, показує зміну вхідного сигналу в цифровому вигляді.
	<i>Scope</i> – осцилограф, показує зміну сигналу у вигляді графіка, дозволяє передавати дані в робочу область <i>MATLAB</i> для подальшої обробки і оформлення.
	<i>Transfer Fcn</i> – передавальна функція, в параметрах задаються чисельник ( <i>Numerator</i> ) і знаменник ( <i>Denominator</i> ) у вигляді поліномів.
	<i>Integrator</i> – інтегратор з можливістю установки початкових умов ( <i>Initial condition</i> ), а також меж насичення ( <i>Lower saturation limit</i> u <i>Upper saturation limit</i> ).
	<i>Gain</i> – підсилювач, задається коефіцієнт підсилення ( <i>Gain</i> ).
	<i>Sum</i> – суматор, використовується для додавання і віднімання входів.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления. Учеб. пособие для вузов / А. А. Воронов. – М. : Высш. школа, 1977. – 519 с.
2. Основы автоматического регулирования и управления / Под ред. В. М. Пономарёва. – М. : Высшая школа, 1974. – 438 с.
3. Автоматизация электроподвижного состава / Под ред. А. Н. Савоськина. – М. : Транспорт, 1990. – 450 с.
4. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей / А. А. Булгаков. – М. : Наука, 1979. – 301 с.
5. Джури Э. В. Импульсные системы автоматического регулирования / Э. В. Джури. – М. : Госфизматиздат, 1963. – 455 с.

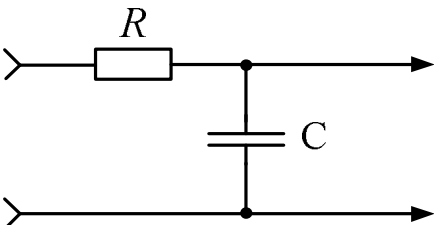
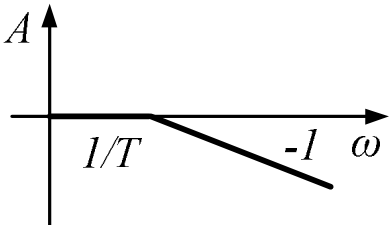
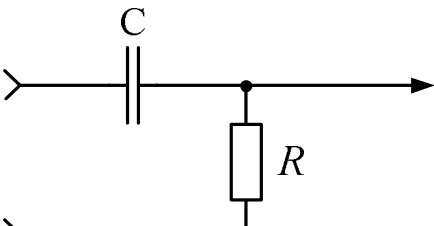
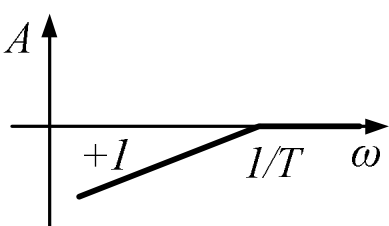
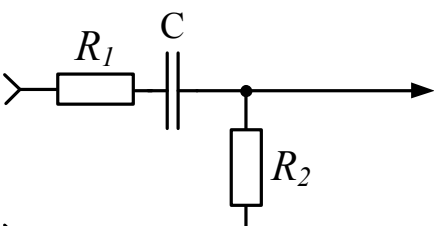
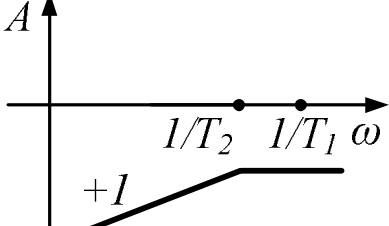
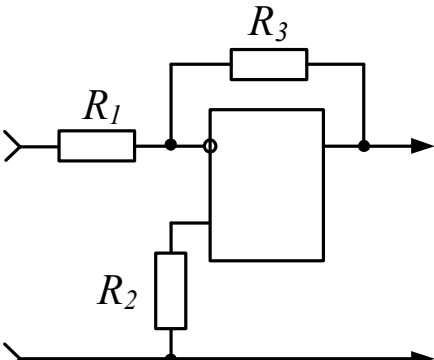
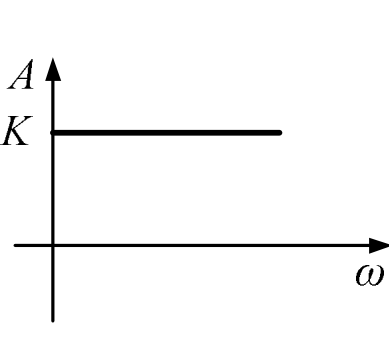
## ДОДАТОК А

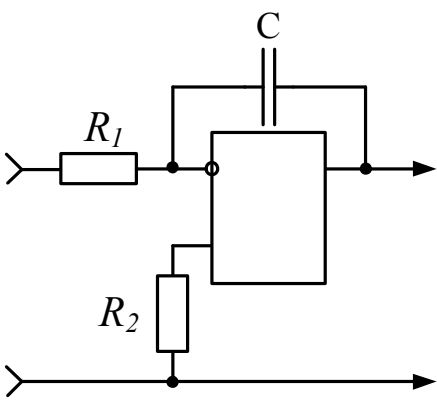
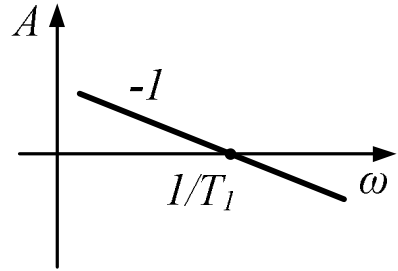
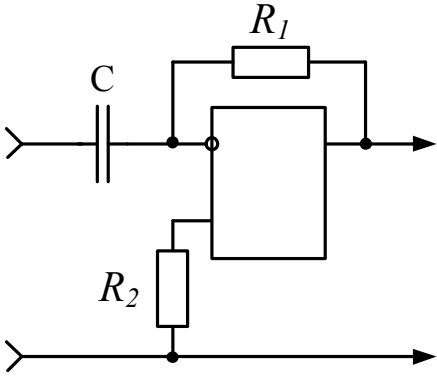
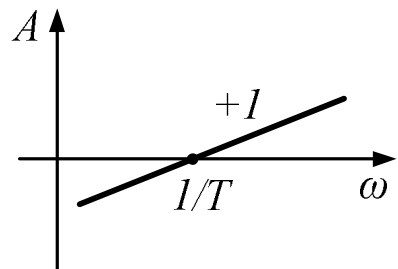
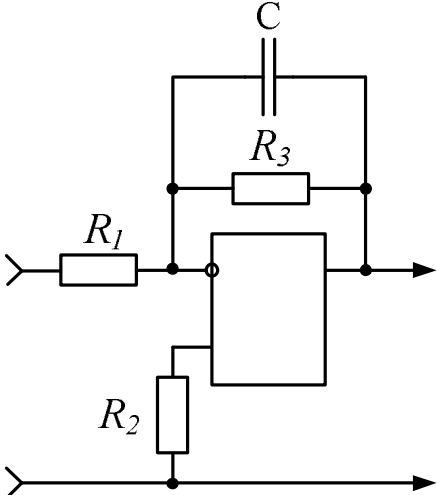
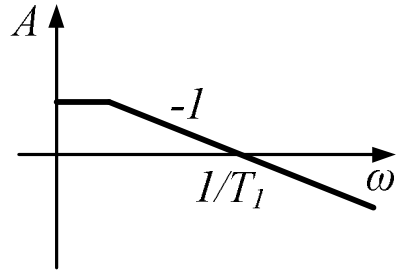
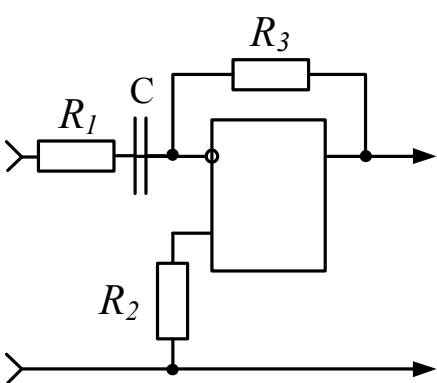
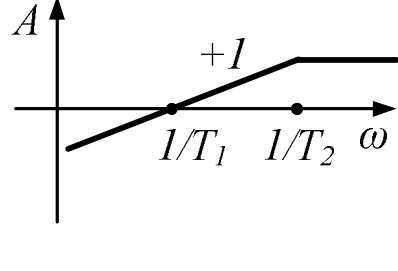
### Варіанти завдання на курсову роботу

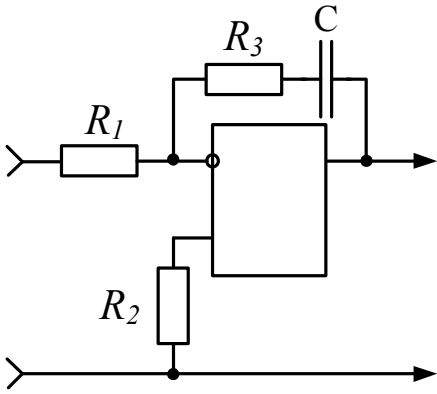
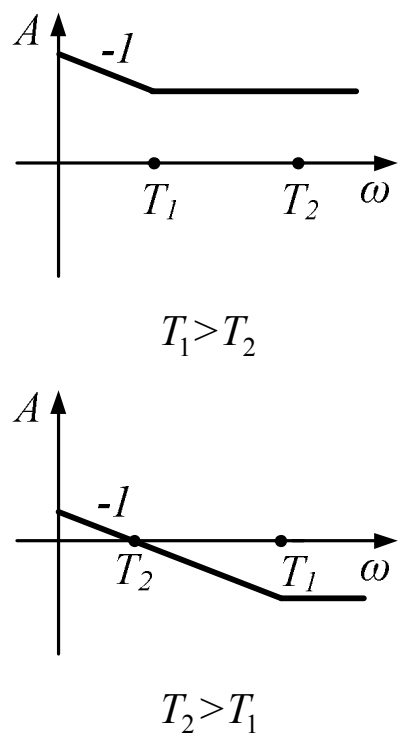
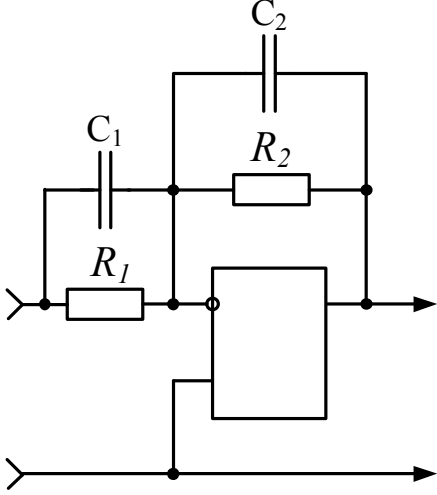
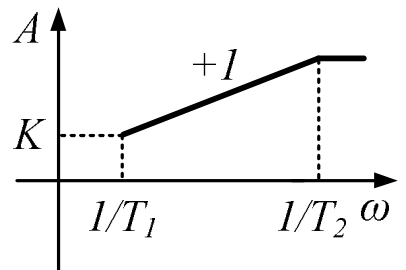
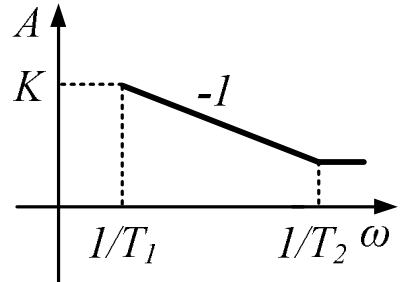
№	$U_M$	$U_Y$	$U_3$	$L_{O3}$	$R_{O3}$	$f_{\partial c}$	$T_\phi$	$\varepsilon$	$\delta$	$t_p$	$m$
	[В]	[В]	[В]	[ГН]	[ОМ]	[Гц]	[с·10 <sup>-3</sup> ]	[%]	[%]	[с·10 <sup>-3</sup> ]	
1	50	0-10	1	0,1	5	1000	2	1	10	20	6
2	60	0-10	2	0,12	15	1000	2,5	2	20	30	6
3	75	0-10	3	0,1	8	1000	1,5	5	10	15	6
4	100	0-10	4	0,12	10	1000	3	10	20	20	6
5	125	0-10	5	0,15	15	1000	3,5	10	10	30	6
6	150	0-10	6	0,1	6	1000	2	0,5	20	15	6
7	175	0-10	7	0,1	10	1000	3	5	10	20	6
8	200	0-10	8	0,15	15	1000	1	10	20	30	6
9	225	0-10	7	0,75	20	1000	2	0,5	10	50	6
10	250	0-10	6	0,75	10	1000	1,5	1	20	30	6
11	275	0-10	5	0,5	5	1000	2	2	10	20	6
12	300	0-10	4	0,1	7	1000	2,5	0,5	20	15	6
13	280	0-10	3	0,1	6	1000	1	5	10	20	6
14	260	0-10	2	0,75	8	1000	2	10	20	30	6
15	240	0-10	1	0,5	3	1000	1	5	10	50	6
16	220	0-10	2	0,5	10	1000	3	2	20	30	6
17	190	0-10	3	0,75	8	1000	2	1	10	20	6
18	170	0-10	4	0,5	2	1000	1,5	1	20	15	6
19	150	0-10	5	0,75	6	1000	2	2	10	20	6
20	130	0-10	6	0,75	15	1000	2,5	5	20	30	6
21	110	0-10	7	0,6	12	1000	2	10	10	50	6
22	90	0-10	8	0,1	9	1000	3	10	20	30	6
23	70	0-10	7	0,8	10	1000	1,5	2	10	20	6
24	55	0-10	8	0,75	25	1000	2	1	20	15	6
25	45	0-10	5	0,6	8	1000	2,5	2	10	20	6
26	65	0-10	4	0,2	15	1000	1,5	5	20	30	6
27	115	0-10	3	0,4	8	1000	9	2	10	25	6
28	145	0-10	2	0,35	5	1000	3	10	20	40	6
29	180	0-10	1	0,8	20	1000	5	1	10	20	6
30	230	0-10	2	0,55	5	1000	7	5	20	50	6

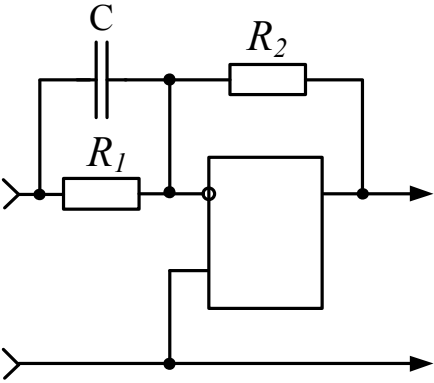
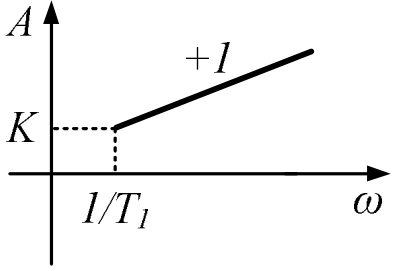
# ДОДАТОК Б

Електричні ланки корегуючих кіл системи автоматичного регулювання

$H(p)$	Електрична схема	Л.А.Х.
$\frac{1}{Tp+1}$ , $T = R \cdot C$		
$\frac{Tp}{Tp+1}$		
$\frac{T_1 p}{T_2 p + 1}$ , $T_1 = R_2 \cdot C$ , $T_2 = (R_1 + R_2) \cdot C$		
$K$ $K = -\frac{R_3}{R_2}$ , $R_2 = R_3 // R_1$		

$H(p)$	Електрична схема	Л.А.Х.
$\frac{1}{Tp}$ , $T = R_1 \cdot C$		
$Tp$		
$\frac{K}{Tp+1}$ , $K = -\frac{R_3}{R_2}$ , $T = R_3 \cdot C$		
$\frac{T_1 p}{T_2 p + 1}$ , $T_1 = R_3 \cdot C$ , $T_2 = R_1 \cdot C$		

$H(p)$	Електрична схема	Л.А.Х.
$\frac{T_1 p + 1}{T_2 p}$ $T_1 = R_3 \cdot C,$ $T_2 = R_1 \cdot C$		 <p style="text-align: center;"><math>T_1 &gt; T_2</math></p> <p style="text-align: center;"><math>T_2 &gt; T_1</math></p>
$K \cdot \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1},$ $K = -\frac{R_2}{R_1},$ $T_1 = R_1 \cdot C_1,$ $T_2 = R_2 \cdot C_2$		<p style="text-align: center;">для <math>T_1 &gt; T_2</math></p>  <p style="text-align: center;">для <math>T_1 &lt; T_2</math></p> 

$H(p)$	Електрична схема	Л.А.Х.
$K \cdot (Tp + 1),$ $K = -\frac{R_2}{R_1},$ $T = R_1 \cdot C$		

*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
для виконання курсової роботи  
з навчальної дисципліни

**«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ»**

*(для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти  
за напрямом 6.050702 – Електромеханіка спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (фахове  
спрямування «Електричні системи і комплекси транспортних засобів»,  
«Електричний транспорт», «Електромеханічні системи автоматизації  
та електропривод»))*

Укладачі: **ЩЕРБАК** Яків Васильович,  
**ІВАКІНА** Катерина Яківна

Відповідальний за випуск *О. В. Кульбашиний*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 178М

---

Підп. до друку 29.02.2016 р.  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60×84/16  
Ум. друк. арк. 1,3  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.